

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Л.И.Аверина, А.М.Бобрешов, В.Д.Шутов

(г. Воронеж, Воронежский Государственный Университет, averina@phys.vsu.ru)

## PERFORMANCE OF POWER AMPLIFIER BEHAVIORAL MODELS

L.I. Averina, A.M. Bobreshov, V. D. Shutov

Усилитель мощности (УМ), как известно, является основным нелинейным устройством передающего тракта, а также основным потребителем энергии, поэтому интерес к его моделированию с целью повышения линейности и энергоэффективности в последнее время всё более возрастает. Обычно моделирование усилителей осуществляется либо на структурном уровне, когда модель устройства представляется в виде нелинейной эквивалентной схемы и анализ осуществляется на основе теории цепей, либо на бесструктурном (поведенческом) уровне. Существует множество публикаций и монографий, посвященных поведенческим моделям [1], но нет работ, представляющих сопоставительный анализ этих моделей с точки зрения сложности реализации и точности моделирования для разных видов входных сигналов, их полосы и средней мощности. Поэтому в работе ставилась задача провести данный анализ для различных моделей с нелинейной памятью.

Наиболее полной и общей из поведенческих моделей динамических нелинейных систем является модель Вольтерры, которая представляет собой сумму многомерных сверток. Дискретная форма модели описывается выражением:

$$y[l] = \sum_{k=1}^P \sum_{n_1=0}^Q \sum_{n_2=n_1}^Q \dots \sum_{n_k=n_{k-1}}^Q h_k(n_1, n_2, \dots, n_k) \times \prod_{i=1}^k x[l - n_i],$$

где  $P$  – порядок нелинейности,  $Q$  – глубина памяти.

Одной из наиболее простых модификаций является полиномиальная модель с памятью, математическая форма записи которой выглядит следующим образом:

$$y[l] = \sum_{k=1}^P \sum_{n=0}^Q h_{k,n} x[l - n] |x[l - n]|^{k-1}.$$

Так как рассмотренные выше модели представляют собой различные модификации модели Вольтерры, то алгоритмы определения их параметров аналогичны. В терминах входных и выходных отсчётов сигнала приведённые выше выражения можно представить в матричном виде:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{H},$$

где  $\mathbf{Y}$  – вектор выходных отсчётов,  $\mathbf{H}$  – вектор искомых параметров,  $\mathbf{X}$  – входная матрица, которая содержит различные комбинации произведений входных отсчётов, определяемые идентифицируемой моделью. Решение имеет вид:

$$\mathbf{H} = \mathbf{X}^+ \cdot \mathbf{Y},$$

где знак «+» описывает процедуру псевдообращения Мура–Пенроуза [2]. Псевдообращение можно понимать как наилучшую аппроксимацию (по методу наименьших квадратов) решения соответствующей системы линейных уравнений. Процедура псевдообращения определена для любых матриц над действительными и комплексными числами. Причём псевдообратная матрица может быть вычислена с помощью собственного представления матрицы:

$$\mathbf{X}^+ = (\mathbf{X}^* \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}.$$

В качестве исследуемого усилителя мощности был выбран MRF9060 фирмы *Freescal*. Были реализованы в виде программного модуля алгоритмы идентификации бесструктурных

моделей данного усилителя. В качестве параметра количественно оценивающего эффективность работы моделей использовалась нормированная среднеквадратичная ошибка (*NMSE*). Анализировались полиномиальная модель с памятью и модель Вольтерры, так как они представляют собой наиболее простую и сложную форму описания динамических нелинейных систем. В качестве тестового использовался сигнал с цифровой модуляцией *QAM*. В работе было проведено исследование влияния индекса позиционности сигнала на величину ошибки. В результате анализа установлено, что увеличение индекса позиционности с 16 до 1024 для обучающего сигнала уменьшает нормированную ошибку лишь на 0,5дБ.

Для сравнительного анализа помимо рассмотренных выше инерционных моделей рассматривалась также безынерционная полиномиальная модель, представляемая соотношением:

$$y[l] = x[l] \sum_{k=1}^P a_k |x[l]|^{k-1}.$$

На рис.1, приведена зависимость *NMSE* от ширины полосы сигнала, где кривые 1-3 – полиномиальной модели с памятью (кривая 1 -  $P=5$ ,  $Q=2$ , кривая 2 -  $P=7$ ,  $Q=2$ , кривая 3 -  $P=7$ ,  $Q=4$ ), кривые 4-6 – модели Вольтерры (кривая 4 -  $P=5$ ,  $Q=1$ , кривая 5 -  $P=5$ ,  $Q=3$ , кривая 6 -  $P=7$ ,  $Q=1$ ), кривая 7 соответствует полиномиальной модели без памяти ( $P=7$ ). Как и следовало ожидать, ошибка при использовании модели Вольтерры на 4-7дБ меньше, чем для полиномиальной модели с памятью. Однако количество параметров модели при этом возрастает (42 – для модели Вольтерры  $P=5$ ,  $Q=1$ , 15 – для полиномиальной модели с памятью  $P=5$ ,  $Q=2$ ).

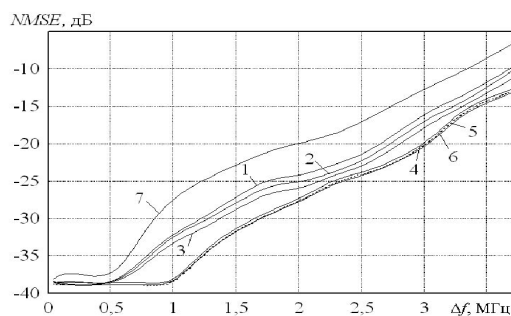


Рис.1

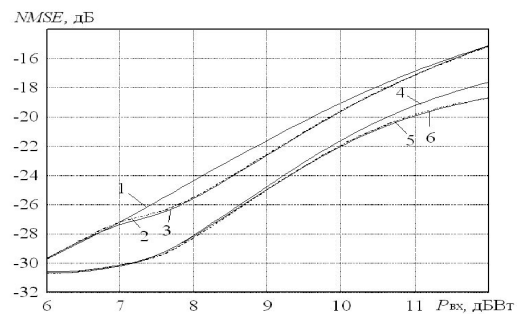


Рис.2

На рис.2 приведена зависимость *NMSE* от средней мощности сигнала на входе усилителя, где кривые 1-3 соответствуют полиномиальной модели с памятью, а кривые 4-6 – модели Вольтерры. При этом величины порядка нелинейности и глубины памяти были выбраны такими же, как и в предыдущем случае. Из графиков видно, что увеличение глубины памяти не уменьшает ошибки ни для полиномиальной модели, ни для модели Вольтерры. Увеличение степени нелинейности приводит к уменьшению ошибки на 0,5-1,5дБ для обеих моделей только в разных диапазонах средних мощностей.

### Литература

1. Pedro J. C. Comparative overview of microwave and wireless power-amplifier behavioral modeling approaches / J. C. Pedro, S. A. Maas // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 53. – 2005. – No.4. – P.1150-1163.
2. Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание / А. Алберт; Под ред. Я. З. Цыпкина; Пер. с англ. Р.Ш. Липцера – М.: Наука, 1977. – 223с